

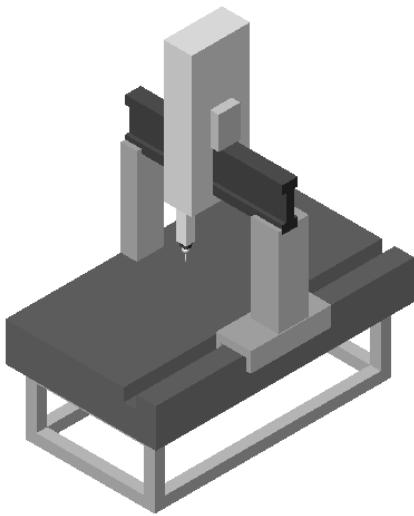
# FORMA 3D

FORMAÇÃO AVANÇADA DE METROLOGISTAS 3D

---

## MÓDULO 3

**METROLOGISTA 3D – NÍVEL A**



FORMA 3D  
Nível A ★ ★ ★  
METROLOGISTA 3D

**André Roberto de Sousa**

# FORMA3D

***“Seja como for, a grandiosa Revolução Humana de uma única pessoa irá um dia impulsionar a mudança total do destino de um país e, além disso, será capaz de transformar o destino de toda a humanidade.”***

**Frase Budista**

Esse material possui finalidade puramente didática e serve única e exclusivamente de material de apoio aos participantes dos cursos do programa **FORMA3D**. É proibida a sua venda como material em separado.

Ao longo do texto existem diversas ilustrações e imagens de máquinas de medir por coordenadas, software de medição e outros equipamentos metrológicos. Todas elas foram gentilmente cedidas pelos seus respectivos fabricantes para serem utilizados como exemplos didáticos nesse material.

Os textos e as ilustrações elaborados especificamente para esse material didático possuem os seus direitos autorais devidamente registrados.

## APRESENTANDO

A Tecnologia de Medição por Coordenadas ou Medição 3D é atualmente o recurso mais poderoso e estratégico que a Indústria metal-mecânica possui para garantir a precisão dimensional dos produtos e aumentar a eficiência dos processos. Por sua automatização, grande flexibilidade e enormes potencialidades geométricas, a Medição 3D apresenta grandes vantagens sobre outros métodos de medição e tem sido aplicada cada vez com mais frequência em todas as fases do ciclo produtivo de peças mecânicas, do desenvolvimento até o controle da produção seriada.

No entanto, como em todo processo de rápida absorção tecnológica, a disseminação da Medição 3D não foi acompanhada pela necessária adequação na formação do pessoal técnico. Por seu caráter matemático, sua sofisticação tecnológica e grande integração com o sistema de manufatura, a Medição 3D requer uma formação mais ampla do que somente a capacitação na operação da máquina e do software de medição, como ocorre atualmente.

A carência dessa formação mais ampla provoca um hiato entre as potencialidades da tecnologia e a capacidade do pessoal técnico em explorar os seus recursos de forma confiável e eficiente. O elo fraco da corrente para a qualidade dos processos de medição tem sido, inquestionavelmente, o elemento humano e, infelizmente, é grande o custo com retrabalhos e refugos causados por falta de confiabilidade metrológica nos processos de medição por coordenadas.

O Programa de Formação avançada de Metrologistas 3D nasceu dessa necessidade e tem o objetivo de oferecer uma capacitação ampla e padronizada para os usuários da medição 3D e, com isso, contribuir para mudar o panorama da qualificação do pessoal técnico envolvido com as operações de Medição 3D na Indústria Brasileira.

Sua concepção, estruturação e execução obedecem a critérios técnicos e pedagógicos muito bem planejados, de acordo com as diretrizes educacionais mais atuais do Ministério da Educação e adequado à realidade da Indústria Brasileira e ao nível educacional dos profissionais técnicos que nela atuam. Pela enorme presença e importância da Medição 3D nos processos da Indústria Brasileira, consideramos, sem dúvida, o FORMA3D um programa estratégico para potencializar a qualidade e a produtividade da indústria metal-mecânica nacional.

## **A MOTIVAÇÃO PARA CRIAR UM PROGRAMA DE FORMAÇÃO EM METROLOGIA 3D**

A rápida disseminação da tecnologia de Medição por Coordenadas no Brasil e no mundo não foi acompanhada pelo necessário cuidado na formação do pessoal técnico que trabalha com essa tecnologia, extremamente importante para a garantia da qualidade de processos e produtos na indústria atual.

Por sua sofisticação tecnológica e caráter matemático, a Medição por Coordenadas, ou Medição 3D, requer uma formação técnica mais ampla do que somente nos aspectos operacionais da máquina de medir, que depende de cada fabricante. O pleno entendimento da tecnologia e dos processos que ocorrem antes, durante e após uma medição requer uma capacitação bem mais ampla do que somente a qualificação para operar a máquina e o software de medição. Essa qualificação operacional é bem atendida pelos fabricantes de máquinas de medir, mas a qualificação ampla não é contemplada de modo padronizado.

Essa deficiência na formação faz com que as potencialidades de melhoria que a Medição 3D oferece sejam sub-aproveitadas e que, muitas vezes, a Medição 3D traga graves problemas para as empresas. Informações erradas são geradas, que levam à tomada de decisões erradas, com sérias conseqüências em termos de custo e qualidade. Infelizmente, o elemento humano é o elo fraco da corrente que leva à confiabilidade metrológica nos resultados da medição 3D.

Muito investimento se faz na aquisição da tecnologia de medição por coordenadas e preparação de sala de medidas, mas muito pouco se faz para a formação do profissional que trabalha com essa tecnologia, e essa realidade não é exclusiva do Brasil. Em todo o mundo esse problema ocorre.

Motivados por oferecer cursos de formação específicos para o pessoal técnico que trabalha com a Medição 3D, em vários países começam a surgir programas de formação amplos e independentes, com o suporte de instituições de ensino, de modo a padronizar a formação dos Metrologistas 3D.

Conhecendo profundamente as carências da realidade Brasileira nesse campo, especialistas técnicos e pedagógicos da Indústria e de Centros de Formação se uniram para formular e elaborar um conceito de treinamento inédito no Brasil e em boa parte do mundo, resultando no programa FORMA3D: um programa de capacitação amplo e independente de fabricantes de máquinas, ministrado por pessoas de reconhecida competência na área, com avaliação e certificação por uma Instituição de Ensino Tecnológico.

## O PROGRAMA FORMA3D

O FORMA3D é um programa de treinamento independente e generalista, focado em todos os **conhecimentos, habilidades e atitudes** necessárias para que o pessoal técnico que atua direta ou indiretamente com a medição por coordenadas possa desempenhar com eficiência e confiabilidade as suas atividades. O seu objetivo principal consiste em oferecer uma capacitação técnica ampla e independente para os profissionais envolvidos com a Medição 3D na Indústria Brasileira.

A estruturação do programa é multi-institucional e foi realizada por profissionais de empresas e instituições de ensino com até 20 anos de experiência em Medição por Coordenadas, conhecendo profundamente as carências da realidade Brasileira nesse campo. Esses profissionais realizaram pesquisas em várias empresas usuárias da Medição 3D e, com base na observação da realidade Brasileira, condensaram todas as competências e habilidades necessárias à execução das funções do Metrologista 3D<sup>1</sup>.

Com base nesse conjunto de competências e habilidades foi definida a estrutura curricular do FORMA3D, contemplando 3 níveis crescentes de especialização:

### **Módulo 1: Metrologista 3 D – Nível C**

#### ***Estratégias para a Garantia da Exatidão na Medição 3D***

*Profissional com competência para entender os princípios funcionais e fontes de erros da medição por coordenadas, operacionalizar uma medição de forma eficiente e confiável, e validar um processo de medição com base na sua incerteza comparada às tolerâncias do produto.*

---

<sup>1</sup> A estrutura do FORMA3D está organizada por competências, em conformidade com as diretrizes curriculares do Ministério da Educação para o ensino tecnológico. De acordo com o parecer 16/99 do Conselho Nacional de Educação, competência é entendida como “a capacidade de articular, mobilizar e colocar em ação: valores, conhecimentos e habilidades necessários para o desempenho eficiente e eficaz de atividades requeridas pela natureza do trabalho”.

## **Módulo 2: Metrologista 3 D – Nível B**

### ***Controle 3D do GD&T com Programação CNC***

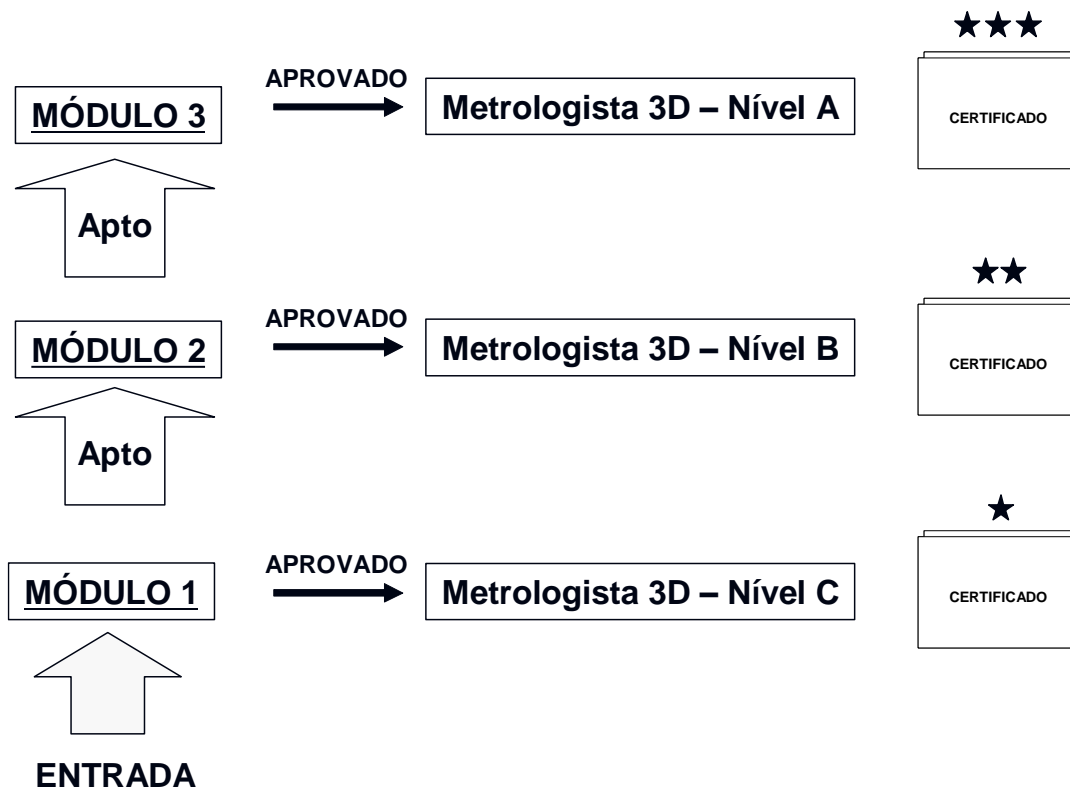
*Profissional com competência para interpretar e analisar criticamente as tolerâncias dimensionais e geométricas (GD&T) contidas nos desenhos de produto de acordo com normas internacionais (ASME Y14.5-M e ISO1101), definir estratégias de medição consistentes, elaborar programas CNC, avaliar a incerteza da medição e verificar a sua confiabilidade em relação às tolerâncias GD&T.*

## **Módulo 3: Metrologista 3 D – Nível A**

### ***Calibração de Máquinas e MSA de Processos de Medição 3D***

*Profissional com competência para: coordenar equipes com operadores e programadores; participar de equipes para definição de projeto orientado à montagem no desenvolvimento de produtos e interagir com especialistas da produção para corrigir não conformidades dimensionais nas peças; avaliar a performance metrológica de máquinas de medir por coordenadas segundo normas ISO10360 e avaliar a adequação de processos de medição aos requisitos de controle de produto e processos, aplicando o Guia MSA 3ª edição.*

Os três módulos são cursados em seqüência. Ao longo e ao final de cada Módulo, as competências e habilidades dos participantes são avaliadas. Caso demonstre proficiência nessa avaliação de competências, o participante será certificado no seu respectivo módulo, como mostra a figura a seguir, estando apto a cursar o módulo seguinte. Os módulos serão ministrados por profissionais de reconhecida competência e somente após um processo de credenciamento pelo programa FORMA3D.



### Progressão no Curso

Com base nessa estrutura curricular e forma de operação, o programa FORMA3D se caracteriza como um curso de formação amplo e independente, oferecendo à Indústria Brasileira a possibilidade de uma padronização na capacitação dos profissionais da Medição 3D. Essa padronização pode, no médio prazo, caracterizar a função de Metrologista 3D dentro das empresas e servir de base para a estruturação de planos de carreira do pessoal envolvido com a Medição por Coordenadas.

Para consolidar o programa nacionalmente como um curso de formação padronizado e reconhecido pelos usuários da Medição 3D e por órgãos envolvidos com a promoção da Metrologia e da Qualidade no Brasil, o programa FORMA3D permanece em constante articulação com empresas, entidades de classe, instituições de ensino e pesquisa e órgãos governamentais.



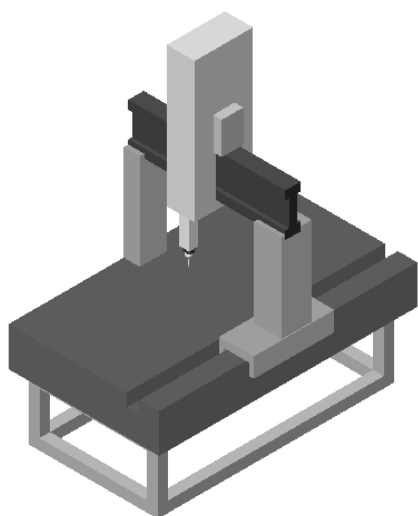
# FORMA3D

FORMAÇÃO AVANÇADA DE METROLOGISTAS 3D

---

## MÓDULO 3

**METROLOGISTA 3D – NÍVEL A**



FORMA3D  
Nível A ★ ★ ★  
METROLOGISTA 3D

**André Roberto de Sousa**

# CONTEÚDO & ÍNDICE

<b>1. Analisando a Exatidão da Máquina de Medir por Coordenadas</b>	<b>16</b>
1.1 O compromisso da máquina de medir 3D com a boa exatidão	16
1.2 Influência dos erros de medição nos índices de qualidade de processos seriados	23
1.3 Causas dos Erros da Máquina de Medir por Coordenadas	30
1.4 Erros Geométricos da Máquina de Medir por Coordenadas	33
1.5 Efeito dos erros da Máquina sobre o controle de Tolerâncias Dimensionais e Geométricas	37
<b>2. Métodos para garantir a rastreabilidade dos resultados de medições 3D</b>	<b>47</b>
2.1 Calibração (ou avaliação de performance) com padrões	48
2.2 Medição por Comparação	51
2.3 Simulação computacional	55
2.4 Calibração para tarefa específica de medição	58
<b>3. Avaliação experimental da exatidão de máquinas de medir 3D</b>	<b>62</b>
3.1 Ensaaios geométricos e Avaliação de Performance	62
3.1.1 Métodos diretos	62
3.1.2 Métodos indiretos	65
3.2 Objetivos dos Testes de Exatidão na Máquina de Medir	67
3.2.1 Calibração e ajuste em fábrica	67
3.2.2 Teste de aceitação pelo fabricante	68
3.2.3 Teste de aceitação para o usuário	70
3.2.4 Calibração e ajustes periódicos	71
3.2.5 Verificação periódica (interim checks)	72

<b>3.3</b>	<b>Normalização em Ensaios de máquinas de medir 3D</b>	<b>73</b>
3.3.1	<i>ANSI B89.4.1 1997 – Estados Unidos</i>	77
3.3.2	<i>VDI/VDE 2617 – Alemanha</i>	80
3.3.3	<i>BS6808 – British Standard – Inglaterra</i>	83
3.3.4	<i>JIS B 7440 – Japão</i>	85
3.3.5	<i>CNOMO E40.69.130 – França</i>	88
3.3.6	<i>ISO 10360 – Internacional</i>	94
<b>3.4</b>	<b>Entendendo e utilizando os certificados de calibração de máquinas</b>	<b>95</b>
<b>3.5</b>	<b>Determinação do intervalo entre calibrações</b>	<b>100</b>
<b>4.</b>	<b>Ensaios em Máquinas de Medir 3D segundo Norma ISO10360</b>	<b>106</b>
<b>4.1</b>	<b>ISO10360 – Parte 1: Vocabulário</b>	<b>106</b>
<b>4.2</b>	<b>ISO10360 – Parte 2: Máquinas de Medir empregadas para controle dimensional</b>	<b>117</b>
4.2.1	<i>Ensaios de Aceitação e Reverificação da Máquina</i>	118
4.2.2	<i>Avaliação da exatidão volumétrica</i>	120
4.2.3	<i>Avaliação do erro de apalpação</i>	124
<b>4.3</b>	<b>ISO10360 – Parte 3: Máquinas com mesa rotativa como 4º eixo</b>	<b>128</b>
<b>4.4</b>	<b>ISO10360 – Parte 4: Máquinas usadas em modo de scanning</b>	<b>131</b>
<b>4.5</b>	<b>ISO10360 – Parte 5: Máquinas com múltiplas pontas de medição</b>	<b>133</b>
<b>4.6</b>	<b>ISO10360 – Parte 6: Estimativa de erros no cálculo de elementos geométricos associados</b>	<b>138</b>
<b>5.</b>	<b>Ensaios de Verificação da máquina de medir 3D</b>	<b>143</b>
<b>5.1</b>	<b>Importância do monitoramento freqüente da exatidão</b>	<b>143</b>
<b>5.2</b>	<b>Cuidados necessários na realização dos ensaios</b>	<b>146</b>
<b>5.3</b>	<b>Ensaio utilizando padrão dimensional</b>	<b>149</b>
5.3.1	<i>Padrões 1D</i>	149
5.3.2	<i>Padrões 2D</i>	153
5.3.3	<i>Padrões 3D</i>	157

5.4	Ensaio utilizando peça calibrada _____	159
5.5	Ensaio utilizando peça não calibrada _____	163
5.6	Roteiro prático para realização de ensaio de verificação em máquinas de medir 3D 165	
<b>6.</b>	<b>Avaliação estatística de processos de medição _____</b>	<b>172</b>
6.1	Fundamentação em CEP - Controle Estatístico de Processos _____	172
6.2	Controle Estatístico de Processos de Medição _____	180
6.3	Propriedades estatísticas de um processo de medição _____	184
6.3.1	<i>Tendência</i> _____	185
6.3.2	<i>Estabilidade</i> _____	186
6.3.3	<i>Linearidade</i> _____	187
6.3.4	<i>Repetitividade</i> _____	188
6.3.5	<i>Reprodutibilidade</i> _____	189
6.4	Avaliação da Estabilidade de longo prazo em processos de medição _____	190
6.5	Avaliação da “Capabilidade” de processos de medição _____	199
<b>7.</b>	<b>Análise de Processos de Medição segundo MSA 3ª Edição _____</b>	<b>211</b>
7.1	Abordagem sobre o Guia MSA – Measurement System Analysis _____	211
7.2	Objetivos principais de um estudo MSA _____	213
7.3	Planejamento e Condução de um estudo MSA _____	219
7.4	Parâmetros avaliados em um estudo MSA _____	221
7.4.1	<i>Estabilidade de Longo Prazo</i> _____	221
7.4.2	<i>Estabilidade de Curto Prazo</i> _____	222
7.4.3	<i>Tendência</i> _____	227
7.4.4	<i>Linearidade</i> _____	234
7.4.5	<i>Repetitividade e Reprodutibilidade</i> _____	246
7.4.6	<i>Discriminação</i> _____	252
7.5	Análise R&R de Processos de Medição _____	257

7.5.1	<i>Método da Amplitude</i>	258
7.5.2	<i>Método da Média e Amplitude</i>	261
7.5.3	<i>Método ANOVA</i>	277
7.5.3.1	<i>Modelo aditivo</i>	281
7.5.3.2	<i>Modelo com Interação</i>	287
<b>8.</b>	<b><i>MSA aplicado a Processos de Medição 3D</i></b>	<b>297</b>
<b>8.1</b>	<b><i>Importância de MSA em Processos de Medição 3D</i></b>	<b>297</b>
8.1.1	<i>Importância Técnica</i>	297
8.1.2	<i>Importância Econômica</i>	301
<b>8.2</b>	<b><i>Características particulares do MSA em Medição 3D</i></b>	<b>303</b>
8.2.1	<i>Influência dos erros de forma da própria peça</i>	303
8.2.2	<i>Influência de dispositivos de fixação</i>	307
8.2.3	<i>Influência do operador em medição manual e em medição CNC</i>	309
<b>8.3</b>	<b><i>Planejamento e Execução de um MSA em Medição 3D</i></b>	<b>311</b>
<b>8.4</b>	<b><i>Problemas freqüentes revelados por estudos de MSA</i></b>	<b>314</b>
8.4.1	<i>Identificação de causas especiais influenciando a medição 3D</i>	314
8.4.2	<i>Fatores de influência que afetam a exatidão dos resultados</i>	318
8.4.3	<i>Fatores de influência que afetam a variabilidade dos resultados</i>	319
<b>8.5</b>	<b><i>Interpretando dos resultados de MSA de processos de Medição 3D</i></b>	<b>320</b>
8.5.1	<i>Linearidade e Tendência altas</i>	320
8.5.2	<i>Diferença entre medidas de operadores no gráfico de Médias</i>	321
8.5.3	<i>Pontos fora do limites de controle em gráfico de amplitudes</i>	322
8.5.4	<i>Varição entre peças é extremamente pequena</i>	323
8.5.5	<i>Repetitividade ruim</i>	326
8.5.6	<i>Reprodutibilidade ruim</i>	327
8.5.7	<i>%R&amp;R sobre Tolerância do produto Inaceitável</i>	329
8.5.8	<i>%R&amp;R sobre Variação Total Inaceitável</i>	333
8.5.9	<i>Interação significativa entre peça e operador</i>	336
<b>8.6</b>	<b><i>Reduzindo a variabilidade nos resultados através de medições repetidas</i></b>	<b>338</b>
<b>8.7</b>	<b><i>Exemplos práticos de Estudos de MSA em Medição 3D de peças produzidas por diferentes processos de fabricação</i></b>	<b>339</b>

8.7.1	<i>MSA de Processos de Medição 3D de peças Usinadas</i>	339
8.7.1.1	<i>Características particulares dos processos e produtos da usinagem</i>	339
8.7.1.2	<i>Exemplo de MSA de Processo de medição por coordenadas de peça usinada</i>	341
8.7.2	<i>MSA de Processos de Medição 3D de peças conformadas</i>	347
8.7.2.1	<i>Características típicas dos processos e produtos conformados</i>	347
8.7.2.2	<i>Exemplo de MSA de Processo de medição por coordenadas de peça estampada</i>	349
8.7.3	<i>MSA de Processos de Medição 3D de peças Fundidas</i>	355
8.7.3.1	<i>Características típicas dos processos e produtos da Fundição</i>	355
8.7.3.2	<i>Exemplo de MSA de Processo de medição por coordenadas de peça fundida</i>	357
8.7.4	<i>MSA de Processos de Medição 3D de peças Plásticas</i>	364
8.7.4.1	<i>Características típicas dos processos e produtos plásticos</i>	364
8.7.4.2	<i>Exemplo de MSA de Processo de medição por coordenadas de peça plástica</i>	366
<b>ANEXOS</b>		<b>373</b>
<b>BIBLIOGRAFIAS</b>		<b>377</b>